

大型厚壁筒体斜插弯管接头应力 特征有限元快速预测

张可荣¹, 张建勋¹, 黄嗣罗², 邱毅强²

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 茂名重力
石化机械制造有限公司, 525000, 广东茂名)

摘要: 针对大型厚壁焊接结构尺寸大、焊接时间长,以及有限元计算需要耗费大量时间和空间的特点,基于 ANSYS 有限元软件,建立了简化焊道数、简化移动热源及两者都简化的多道焊过程应力有限元快速预测模型. 针对厚度达 125 mm 的筒体斜插弯管接头,分别采用 3 种简化模型预测了其残余应力及过程应力的演化特征,得出了 3 种简化模型在进行大型厚壁结构多道焊过程应力预测中的异同. 结果表明:采用简化焊道数的方法计算接头应力,在焊道填充方向的误差大于简化移动热源的方式;当研究相同焊道平面内的应力状态时,简化移动热源的方式比简化焊道数具有更大误差. 这是因为简化移动热源,会增大接头的过程应力峰值,而简化焊道数,对于焊道数较多、焊接时间较长的接头的过程应力可能具有更大的影响.

关键词: 大型厚壁;快速预测;过程应力

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0068-04

Fast Finite Element Stress Prediction for Large Thick-Wall Welded Cylinder with Angle-Inserting Elbow

ZHANG Kerong¹, ZHANG Jianxun¹, HUANG Siluo², QIU Yiqiang²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. The Challenge Petrochemical Machinery Corporation of Maoming, Maoming, Guangdong 525000, China)

Abstract: Facing a huge memory space and long calculating period in finite element calculation for large thick-wall welded structure, three predictor models based on software ANSYS with simplification of bead number, moving heat source, and both of them respectively are presented. Under the three simplifications, the residual stress and the process stress of the welded cylinder with angle-inserting elbow and thickness of 125 mm are evaluated, and as a result, the similarities and differences for the welding stress are obtained. It shows that the residual stress in simplified bead model has greater error than that by simplified moving heat source model in direction of bead filled, and the stress in simplified moving heat source model has greater error than that by simplified bead model in the same bead plane. The process peak stress increases in case of simplified moving heat source model, and the process stress of the joint with many beads or a very long welding time is affected more significantly by the simplified bead model.

Keywords: large thick-wall; fast prediction; stress evolution

大型厚壁结构焊接必须采用多层多道焊才能完成,一旦在焊接中出现高应力,将很难弥补. 利用有

限元对厚壁多道焊接头应力状态进行预测,是一项具有非破坏性和显著经济效益的方法.

由于大型厚壁结构尺寸大、焊接时间长,因此计算时需要花费大量的时间和存储空间.文献[1]综述了国内外学者在提高焊接计算效率方面所作的大量研究,在进行大厚壁多道焊结构数值计算中,很多研究都应用了简化方法,例如将三维模型简化为二维模型,文献[2-3]就是利用二维轴对称模型对圆管对接多道焊过程进行了计算.在有些情况下,厚壁多道焊问题并不能简化为二维计算,而必须进行复杂的多道焊计算.文献[4]将焊道数进行了适当的简化,其他多道焊的简化计算方法还包括:针对材料存在力学熔点的特性,采用设置中止条件的方法来忽略高温阶段过程^[5],将弹性和塑性过程分开计算^[6],利用迭代子结构等^[7].

为了更好地模拟实际工程的情况,本文针对厚壁筒体切向斜插弯管接头多道焊的过程,采用三维有限元模型并利用简化手段对其应力特征进行数值模拟,得到了可大幅提高计算效率的预测模型.

1 有限元模型的建立

如图 1 所示,筒体结构由 2 部分组成,在一个外径为 3 600 mm 的厚壁筒体上相贯焊接一个外径为 1 600 mm 的弯管,两筒体结构的壁厚均为 125 mm.弯管切向斜插在厚壁筒体上,弯曲半径为 5 000 mm.根据实际尺寸,建立了 1 : 1 的实体模型,并进行了有限元离散化,将实体模型离散成 35 514 个单元,其中焊缝部位的最小网格尺寸约为 5 mm × 5 mm × 12 mm,焊缝深度尺寸略大,结构网格划分如图 2 所示.

在厚壁筒体一侧的端面上施加轴向约束,以防止水平移动,在筒体端面上距离小弯管焊接位置较远处一点施加约束,以防止结构滚动.为简化计算,设定接头所有部分为同一材料(20G),密度为 $7.89 \times 10^6 \text{ kg/m}^3$,其材料属性^[4]见图 3.采用焊条电弧焊进行焊接,取相贯外坡口,焊速为 16 cm/min,单道焊接的平均时间为 100 min.

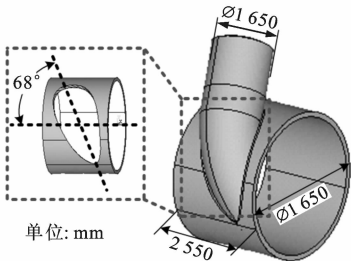


图 1 筒体切向斜插弯管结构及坡口示意图

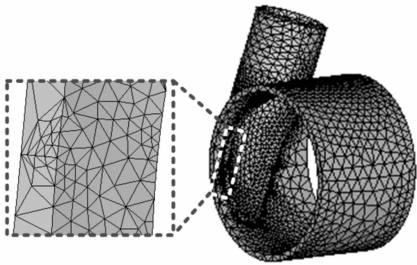
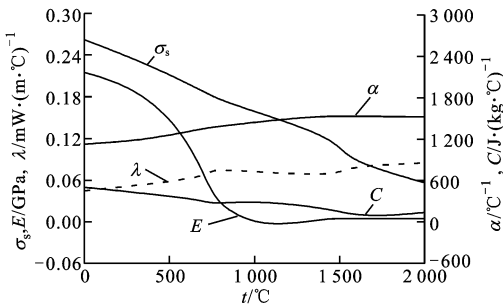


图 2 筒体切向斜插弯管接头有限元模型



α :线膨胀系数; σ_s :屈服极限; E :弹性模量; C :比热容; λ :导热系数

图 3 材料的性能参数

2 数值计算过程

2.1 计算模型的简化

接头采用全位置焊接,每道焊缝由数段长度不等的焊段组成,因此并没有明确初、始焊端.有关资料表明,多道焊过程中影响最大的阶段为焊接的始末时期,而焊接中期的接头应力却改变很小^[8],因此建立了以下 3 种简化模型,它们均采用同样的有限元单元与材料性能参数,且计算中采用相同的总热输入,以分析简化焊接道数与简化移动热源对接头应力的影响.

A 模型:模型焊道数约为 120 道,总焊接时间约需 200 h 以上,而多道焊的中间过程对于残余应力的影响相对不太重要,如对 120 道焊接全部计算,不仅计算量巨大,且无太大意义,因此将焊道数简化为 5 道,基本可代表焊缝为 120 道时的状态,即焊道数并未简化.简化为 5 道焊后的焊接顺序及尺寸如图 4 所示,计算中不考虑简化移动热源的影响.

B 模型:将整个焊缝简化为 1 道,对焊缝各部位按顺序加热,即考虑了简化移动热源的影响.

C 模型:焊缝简化为 1 道,且不考虑简化移动热源的影响.

2.2 热源模型的确定

热源模型采用在相关焊缝施加线性温度的方式实现,线性温度作用时间 t_h 可由每段焊道总长度 L_h

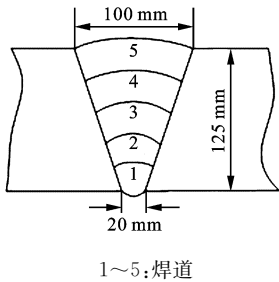


图4 焊道数为5道时的焊接顺序

与相应焊速 v 的相互关系确定^[9],其表达式为

$$t_h = L_h / v \quad (1)$$

为简化计算,所有焊道长度及焊速均取平均值,热输入温度为 $1\,500\,^{\circ}\text{C}$,其作用时间 t 为 $2.25\,\text{s}$,总热输入按实际焊接工艺确定.因采用焊缝同时生热,会造成焊缝向母材热传导快于实际过程,因此按比例将母材导热系数适当减小,即可减小计算传热速率,使计算热传导过程尽量接近真实过程.

3 简化计算结果的比较

为了比较简化结果,在位于焊缝较平直区域内焊缝的中心线上取 a 为研究点(见图5),并以 a 为边界,沿垂直焊缝方向在筒体外表面取 b 为研究区域(见图6).

3.1 残余应力的计算结果比较

图5比较了采用3种简化模型所得到的接头 a 点处沿焊缝深度 h 在不同位置的 Von Mises 等效应力分布,其中深度为0的位置在焊缝的内表面.从图5中可见,3种简化模型的焊缝在不同深度处的等效残余应力 σ_m 的计算结果相接近,采用多道焊模拟, A 模型结果最符合相关资料中厚壁容器深度方向应力分布的典型描述^[10],但简化为1道焊缝并没有使应力结果改变太大.由于在应力差别最大的距焊缝内表面 $25\,\text{mm}$ 处,3种简化模型的应力仅相差 10% 左右,因此3种模型的应力计算值相差不大.

比较 B、C 模型,可见简化移动热源对厚壁容器

焊道填充方向的应力结果影响较小,采用简化焊道数的方法进行厚壁容器焊接应力计算,在焊道填充方向的误差要大于简化移动热源的方法.

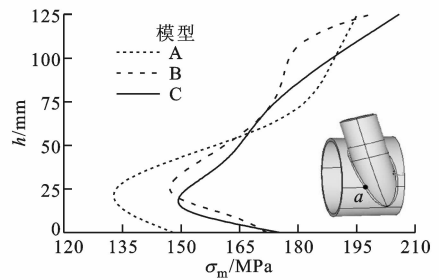


图5 焊缝不同深度处的等效应力

图6为利用3种简化模型所得到的 b 区域内外表面沿垂直焊缝方向,在不同位置 d 处的等效残余应力分布.其中0位置为焊缝中心,可见 A 模型对应力梯度影响稍大,而简化焊道数则影响较小.由此可知,对于焊缝表面等效应力梯度的模拟结果,采用简化焊道数明显要好于简化移动热源的方式,因此当研究相同焊道平面内的应力状态时,采用移动热源加载的精度更高.

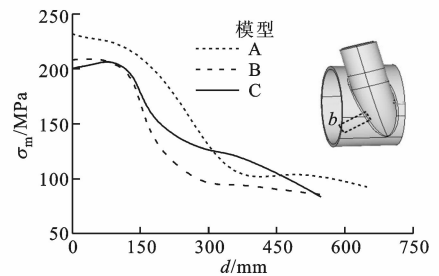


图6 焊缝不同位置处的等效应力

为说明简化方式对接头整体残余应力的影响,图7分别显示了由3种简化模型得到的 σ_m 达到屈服极限的 80% 、 60% 及 50% 的区域,可见3种简化模型计算出的应力达到特定数值的区域位置是比较接近的.3种简化模型 σ_s 的 80% 的区域都位于焊缝上, σ_s 达 50% 的区域也几乎全位于筒体的近缝区.

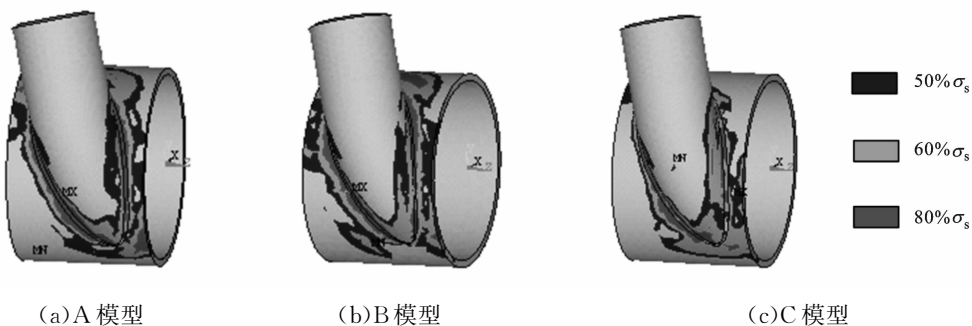


图7 3种简化模型所得的等效残余应力分布

采用简化焊道数与移动热源的方式,对接头整体应力影响不大,接头的基本应力分布差异比较小,不简化焊道数时计算的焊缝应力数值最高,而采用移动热源方式计算出的温度梯度则最小。

3.2 接头过程应力的计算结果比较

为了体现简化方式对接头过程应力的影响,对3种简化模型在 a 点处内外表面部位不同时刻的过程应力 σ 进行了比较,如图8所示。简化焊道数会改变应力峰值出现的时间,使高应力作用时间增加。简化移动热源,则会明显增大过程的应力峰值。由于接头内表面焊道填充较早,3种简化模型焊缝的内表面应力峰值出现的时间大致相同,因此焊道数越多,焊接时间越长,利用简化焊道数模型计算的误差就越大。

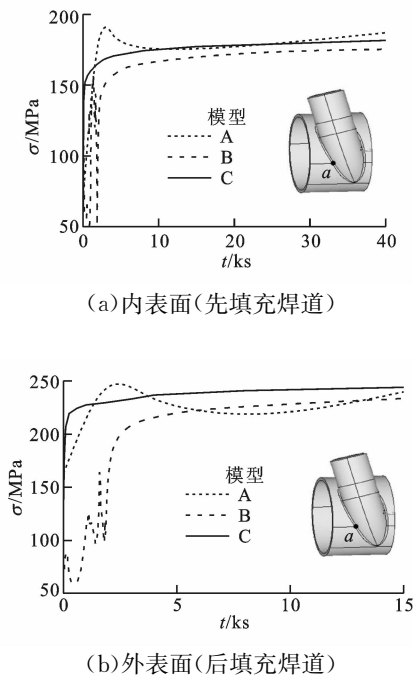


图8 内外表面的等效残余应力循环

4 结论

本文建立了3种筒体斜插弯管的焊接应力快速预测模型,分别针对焊道数和移动热源进行简化,并通过对快速预测模型及其计算结果的分析,得出以下结论。

(1)采用简化焊道数方法进行厚壁容器的焊接残余应力计算,在焊道填充方向的误差比简化移动热源的方式大。

(2)当焊道数相同或研究相同焊道平面内的应力梯度状态时,简化移动热源比简化焊道数的误差更大。

(3)简化移动热源,会明显增大接头过程应力的

峰值,而简化焊道数,对于焊道数较多、焊接时间较长的接头过程应力影响较大。

参考文献:

- [1] TENG T L, CHANG P H. A study of residual stresses in multi-pass girth-butt welded pipes [J]. Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997, 74(1): 59-70.
- [2] DENG Dean, MURAKAWA H, LIANG Wei. Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe [J]. Computational Materials Science, 2008, 42(2): 234-244.
- [3] DENG Dean, MURAKAWA H. Finite element analysis of temperature field, microstructure and residual stress in multi-pass butt-welded 2.25Cr-1Mo steel pipes [J]. Computational Materials Science, 2008, 43(4): 681-695.
- [4] WEN S W, HILTON P, FARRUGIA D J. Finite element modeling of a submerged arc welding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119(1/3): 203-209.
- [5] TSAI C L, PARK S C, CHENG W T. Welding distortion of a thin-plate panel structure [J]. Welding Journal, 1999, 78(5): 157-165.
- [6] CAMILLERI D, MOLLI CONE P, GRAY T F. Alternative simulation techniques for distortion of thin plate due to fillet-welded stiffeners [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2006, 14(8): 1307-1327.
- [7] ZHANG Linjie, ZHANG Jianxun, SERIZAWA H, et al. Parametric studies of welding distortion in fillet welded structure based on FEA using iterative substructure method [J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2007, 12(8): 703-707.
- [8] 陈建波, 罗宇, 龙哲. 大型复杂结构焊接变形热弹塑性有限元分析 [J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 69-72.
- [9] CHEN Jianbo, LUO Yu, LONG Zhe. Analysis on welding distortion of large complicated structure by thermal elastic-plastic finite element method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 69-72.
- [10] SATTARI-FAR I, JAVADI Y. Influence of welding sequence on welding distortions in pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(4): 265-274.
- [11] LEGGATT R H. Residual stresses in welded structures [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(3): 144-151.

(编辑 管咏梅)